

#DataBase:

espacenet

#PatmonitorVersion:

122

#DownloadDate:

2002-07-19

#Title:

Ultra-short optical pulse generator used e.g. for optical coherence tomography, display, printing or shaping systems No title available.

#PublicationNumber:

DE19904565

#PublicationDate:

1999-09-23

#Inventor:

GALVANAUSKAS ALMANTAS (US); ARBORE MARK A (US); FEJER MARTIN M (US); HARTER DONALD J (US)

#Applicant:

IMRA AMERICA INC (US)

#RequestedPatent:

#ApplicationNumber:

DE19991004565

#ApplicationDate:

1999-02-04

#PriorityNumber:

US19980042666;1998-03-17

#IPC:

G02F1/39;H01S3/108;H01S3/16

#NCL:

G02F1/39C;G02F1/35W2

#Equivalents:

JP11326973

#Abstract:

An ultra-short optical pulse generator has a waveguide with an optical parametric generator section (14) for changing the pulse wavelength. An ultra-short optical pulse generator comprises a wavelength conversion channel (12) for changing the wavelength of optical pulses generated by an ultra-short pulse source (10), the channel having an optical waveguide with an optical parametric generator section (14) for parametric generation of the ultra-short optical pulses of the changed wavelength. An Independent claim is also included for a system comprising the above ultra-short pulse generator or for supplying image data to a color picture production apparatus in the form of red, green and blue ultra-short optical pulses. Preferred Features: The ultra-short pulse source is a stationary mode erbium-doped fiber laser, a Ti:sapphire laser, a Cr:forsterite laser, a Cr:LiSaF laser or a Cr:LiSGaF laser.



①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 199 04 565 A 1**

⑤① Int. Cl.⁶:
G 02 F 1/39
H 01 S 3/108
H 01 S 3/16

②① Aktenzeichen: 199 04 565.8
②② Anmeldetag: 4. 2. 99
④③ Offenlegungstag: 23. 9. 99

DE 199 04 565 A 1

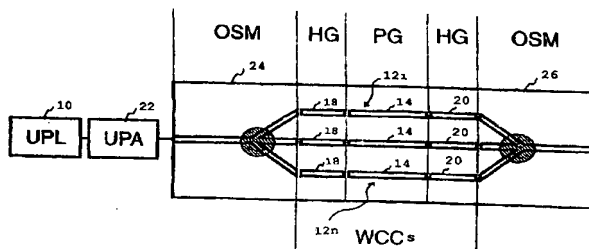
③⑩ Unionspriorität:
09/042,666 17. 03. 98 US
⑦① Anmelder:
IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US
⑦④ Vertreter:
Tiedtke, Bühling, Kinne & Partner, 80336 München

⑦② Erfinder:
Galvanauskas, Almantas, Dr., Ann Arbor, Mich., US;
Arbore, Mark A., Dr., Palo Alto, Calif., US; Fejer,
Martin M., Dr., Menlo Park, Calif., US; Harter,
Donald J., Dr., Ann Arbor, Mich., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ Ultrakurzimpulsquelle mit steuerbarer Mehrfachwellenlängenausgabe

⑤⑦ Ein Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpuls-Lasersystem weist eine Ultrakurzimpulse einer festen Wellenlänge erzeugende Laserquelle (10) und zumindest eine bzw. vorzugsweise eine Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen (12₁-12_n) auf. Das Faserlasersystem wird bevorzugt zur Erzeugung von Ultrakurzimpulsen einer einzelnen Wellenlänge verwendet. Eine optische Trennschaltermatrix (24) richtet die Impulse der Laserquelle in zumindest einen der Wellenlängenumwandlungskanäle (12₁-12_n). Eine optische Verbindungsschaltermatrix (26) wird oberhalb der Wellenlängenumwandlungskanäle (12₁-12_n) angeordnet und verbindet die Ausgaben der unterschiedlichen Wellenlängenumwandlungskanäle (12₁-12_n) in einem einzelnen Ausgabekanal. In einem ferroelektrischen Substrat durch Titaneindiffusion (TI) bzw. Protonaustausch (PE) ausgebildete Wellenleiter bilden vorzugsweise die Wellenleiterumwandlungskanäle (12₁-12_n) und die Trennungs- und Verbindungsmatrizen (24) und (26). Die Verwendung des Wellenleiters erlaubt das Auftreten einer wirksamen optischen parametrischen Erzeugung (14) in den Wellenlängenumwandlungskanälen (12₁-12_n) bei Impulsenergien, die über eine Festmodenlaserquelle verfügbar sind. Das Mehrfachwellenlängen-Lasersystem kann eine Vielzahl von verschiedenen Einzelwellenlängen-Lasersystemen ersetzen. In seiner einfachsten Ausführung kann das System zur Umwandlung der Laserwellenlänge in eine günstigere Wellenlänge verwendet werden. Bei 1,55 µm durch einen ...



DE 199 04 565 A 1

Die Erfindung betrifft allgemein ein Gerät und Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse bei einer Vielzahl optischer Wellenlängen und insbesondere ein Gerät und Verfahren, welches optische Fasern und optische Wellenleiter zur Erzeugung und Steuerung derartiger optischer Impulse verwendet. Der Begriff "Ultrakurz" bezieht sich hier allgemein auf einen Zeitbereich zwischen ungefähr 10^{-15} s (Femtosekunden) und 10^{-12} s (Pikosekunden).

Es ist eine Vielzahl von Lasersystemen zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse bekannt. Unter praktischen Gesichtspunkten können diese Systeme allgemein in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden: Festkörperlasersysteme, welche auf der Verwendung eines Volumen-Laserverstärkungsmediums beruhen, und Faserlasersysteme, welche auf wellenleitenden faseroptischen Komponenten basieren. Aufgrund des ihnen eigenen Aufbaus weisen Faserlaser eine Anzahl von Grundeigenschaften auf, aufgrund denen sie wesentlich geeigneter für breit gestreute praktische Anwendungen sind. Es ist bekannt, daß Faserlaser kompakt, stabil sowie zuverlässig sind und diodengepumpt sein können. Aus vielen Gründen basiert derzeit die am weitesten entwickelte, für Ultrakurzimpuls-Faserlasersysteme geeignete Technik auf Erdotierten Fasern, womit Impulse mit einer Wellenlänge von ungefähr $1,55 \mu\text{m}$ ausgebar sind. Erstens sind Er-dotierte Fasern unter den mit Seltenen Erden dotierten Fasern am besten entwickelt. Außerdem sind Diodenlaser zum Pumpen bzw. Anregen derartiger Fasern gut entwickelt.

Bezeichnenderweise erfordert die Erzeugung ultrakurzer Impulse eine Gestaltsteuerung bzw. Berücksichtigung beim Entwurf der Streuung im Laserhohlraum. Dies kann in einem kompakten Allfaserhohlraum lediglich bei Wellenlängen über $1,3 \mu\text{m}$ erreicht werden, wo die Streuung der optischen Faser entweder auf ein positives oder auf ein negatives Vorzeichen angepaßt sein kann. Eine Vielzahl praktischer Anwendungen für ultrakurze Impulse erfordert jedoch andere Betriebswellenlängen, beispielsweise entweder kürzere oder längere Wellenlängen. Für derartige Wellenlängen können derzeit Femtosekundenimpuls-Faseroszillatoren lediglich unter Verwendung von platzaufwendigen externen diskreten Komponenten wie Sätzen von Prismapaaren zur Steuerung der Streuung innerhalb des Hohlraums entworfen werden.

Das allgemeine und gut bekannte Verfahren zur Ausdehnung des Wellenlängenbereichs irgendeines bestimmten Lasersystems besteht darin, nichtlineare optische Wechselwirkungen auszunutzen, wie beispielsweise optische Frequenzvervielfachung, Summen- oder Differenzfrequenzerzeugung und optische Parametervverstärkung.

Die Frequenzvervielfachung (bzw. Verzerrung bzw. Erzeugung von Oberwellen) ist lediglich zur Umwandlung eines optischen Signals zu einer höheren optischen Frequenz (kürzeren Wellenlänge) geeignet und kann keine abstimmbare oder Mehrfachwellenlängenausgabe bereitstellen. Die Summenfrequenz- und Differenzfrequenzerzeugung erlaubt die Umwandlung eines Signals sowohl zu höheren als auch zu niedrigeren optischen Frequenzen sowie eine Wellenlängenabstimmung, erfordert aber zumindest zwei gut synchronisierte optische Quellen bei zwei verschiedenen optischen Frequenzen. Daher kann keine der Wechselwirkungen alleine eine Mehrfachwellenlängen- oder wellenlängenabstimmbare Ausgabe von einer Einzelwellenlängensignalquelle bereitstellen.

Eine optische parametrische Wechselwirkung ist zur Bereitstellung einer abstimmbaren oder Mehrfachwellenlängenumwandlung unter Verwendung einer optischen Einzel-

wellenlängensignalquelle geeignet. Da die optische parametrische Umwandlung die Umwandlung eines optischen Signals lediglich zu niedrigeren optischen Frequenzen hin (längere Wellenlängen) ermöglicht, kann weiterhin durch Verbinden der parametrischen Wechselwirkung mit zumindest einer der vorstehend beschriebenen Wechselwirkungen eine beliebige optische Frequenz oberhalb oder unterhalb der Signalquellenfrequenz erzielt werden.

Der allgemeine Nachteil der parametrischen optischen Frequenzumwandlung liegt darin, daß zum Erhalt eines ausreichend hohen parametrischen Verstärkungsfaktors zur Verstärkung von spontanem Quantenverteilungsrauschen von mikroskopischen zu makroskopischen Pegeln und demzufolge zum Erhalt einer wirksamen Signal-Energie-Umwandlung hohe Spitzenleistungen und hohe Impulsenergien erforderlich sind. Es ist bekannt, daß die erforderlichen Energien deutlich über den Energien liegen, die direkt von einem typischen Festmoden- bzw. modenverriegelten Ultrakurzimpuls-Laseroszillator erzeugt werden können. Die derzeit besten bekannten Ergebnisse sind ein optischer parametrischer Erzeugungsschwellenwert (OPG) bzw. ein optischer parametrischer Erzeugungsschwellenwert bei $\approx 50 \text{ nJ}$ und ein OPG-Umwandlungswirkungsgrad von $\approx 40\%$ bei ungefähr 100 nJ , und sie wurden in periodisch gepolten Lithiumniobat-Volumenkristallen erzielt, vgl. Galvanuskas et al., "Fiber-laser-based femtosecond parametric generator in bulk periodically poled LiNbO₃", Optics Letters, Bd. 22, Nr. 2, Januar 1997. Zum Vergleich: Typische Femtosekunden-Festmodenimpulsenergien eines Faserlasers liegen in dem Bereich von 10 pJ bis 10 nJ (vgl. Fermann et al., "Environmentally stable Kerr-type mode-locked erbium fiber laser producing 360-fs pulses", Optics Letters, Bd. 19, Nr. 1, Januar 1997 und Fermann et al., "Generation of 10 nJ picosecond pulses from a modelocked fibre laser", Electronics Letters, Bd. 31, Nr. 3, Februar 1995) und die eines Festkörperlasers liegen im Bereich von bis zu $\approx 30 \text{ nJ}$ (vgl. Pelouch et al., "Ti: sapphire-pumped, high repetitionrate femtosecond optical parametric oscillator", Optics Letters, Bd. 17, Nr. 15, August 1992).

Es ist bekannt, daß eine wirksame optische parametrische Wellenlängenumwandlung mit unverstärkten oder verstärkten Festmodenlaserimpulsen erzielbar ist, indem ein nichtlinearer Kristall in einem separaten optischen Hohlraum in einer Weise angeordnet ist, die sicherstellt, daß die Pumpimpulse und die Signalimpulse das parametrische Verstärkungsmedium synchron durchlaufen, wie es beispielsweise dem vorstehend zitierten Aufsatz von Pelouch et al. entnommen werden kann. Da in diesem Fall die parametrische Wechselwirkung wiederholt auftritt, sind die niedrige einfach durchlaufene parametrische Verstärkung und demzufolge die niedrigen Impulsenergien der Festmodenoszillatoren ausreichend für eine wirksamen Umwandlung. Der wesentliche praktische Nachteil dieses Ansatzes liegt darin, daß eine derartige Bauart zwei präzise längenangepaßte optische Hohlräume erfordert, einen für einen Festmodenoszillator und einen weiteren für einen synchron gepumpten optischen Parameteroszillator (OPO). Demzufolge sind derartige OPO-Systeme komplex, groß und intern sehr empfindlich gegenüber den Umgebungsbedingungen (instabil). Weiterhin erfordert eine Wellenlängenabstimmung eines derartigen Systems eine mechanische Bewegung der Abstimmeinrichtungen wie Drehung oder Translation eines nichtlinearen Kristalls, Drehung von Hohlraumspiegeln usw., was mit schneller Wellenlängenabstimmung oder schnellem Wellenlängenschalten unvereinbar ist. Daher können OPOs nicht als praktische Ultrakurzimpulsquellen zur direkten Erzeugung von Mehrfachwellenlängen-Impulsen mit Festmodenoszillatorausgabe dienen.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und Gerät zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse einer veränderlichen oder einstellbaren optischen Wellenlänge aus einer einzelnen Quelle zu schaffen, welche ultrakurze optische Impulse einer festen optischen Wellenlänge bereitstellt.

Weiterhin soll ein Verfahren und Gerät zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse einer Vielzahl optischer Wellenlängen unter Verwendung einer einzelnen Quelle geschaffen werden, welche ultrakurze Impulse einer festen optischen Wellenlänge bereitstellt.

Weiterhin soll eine schnelle Steuerung der Ausgabe eines Lasersystems zur Auswahl unter einer Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen geschaffen werden.

Weiterhin soll eine Vielzahl von Wellenlängen bei der einzelnen Ausgabe des Lasersystems bereitgestellt werden, indem die Ausgabe getrennter Wellenlängenumwandlungskanäle in einem einzelnen Ausgabestrahle verbunden wird.

Weiterhin soll eine wirksame Mehrfachwellenlängen- oder wellenlängeneinstellbare Betriebsart bei relativ niedrigen Impulsenergien und -leistungen ermöglicht werden, die mit vorhandenen Ultrakurzimpuls-Lasersystemen kompatibel ist. Zusätzlich soll ein derartiges System unter Verwendung stabiler, kompakter und zur Massenverarbeitung geeigneter Bestandteile geschaffen werden, damit ein kompaktes, stabiles, einfach herzustellendes und kostengünstiges Gerät bereitgestellt ist.

Diese Aufgabe wird durch die in den Patentansprüchen angegebenen Maßnahmen gelöst.

Insbesondere wird die Aufgabe erfindungsgemäß durch ein System mit einem ersten Teil, der ein Lasersystem zur Erzeugung ultrakurzer Impulse einer festen Wellenlänge aufweist, und einem zweiten Teil, der zumindest einen und vorzugsweise eine Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen aufweist, gelöst. Eine Wellenlängensteuervorrichtung (oder Vorrichtungen) ist zwischen der Lasererzeugungsvorrichtung und den Wellenlängenumwandlungskanälen angeordnet, wobei die Vorrichtung(en) die Impulse der Lasererzeugungsvorrichtung in zumindest einen der Wellenlängenumwandlungskanäle richten. Eine weitere Vorrichtung oder Vielzahl von Vorrichtungen ist unterhalb der Wellenlängenumwandlungskanäle angeordnet und dient der Verbindung der Ausgaben verschiedener Wellenlängenumwandlungskanäle in einen einzelnen Ausgabekanal.

Erfindungsgemäß werden neue optische Wellenleitervorrichtungen für die Wellenlängenumwandlungskanäle, die Wellenlängensteuer- und Strahlsteuervorrichtungen verwendet. Vorzugsweise wird ein Faserlasersystem zur Erzeugung ultrakurzer Impulse einer einzelnen Wellenlänge verwendet.

Das erfindungsgemäße Mehrfachwellenlängen-Lasersystem ersetzt vorteilhaft eine Vielzahl verschiedener Einzelwellenlängen-Lasersysteme.

Eine erfindungsgemäße Anwendung liegt in Systemen, die ultrakurze optische Impulse bei Wellenlängen erfordern, die von der Wellenlänge des Impuls-erzeugenden Lasers verschieden sind. Das erfindungsgemäße System kann beispielsweise die Ultrakurzimpuls-Wellenlänge auf näherungsweise $1,3 \mu\text{m}$ für die optische Kohärenztomographie (OCT) verschieben, bei der Gewebe am transparentesten sind.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine Ansicht einer Ultrakurzimpuls-Laserquelle;

Fig. 2 eine Ansicht eines bevorzugten Wellenleitersaufbaus für die erfindungsgemäßen Wellenlängenumwandlungskanäle;

Fig. 3 eine grafische Darstellung der Abhängigkeit des Energieschwellenwerts der theoretischen optischen parametrischen Erzeugung (OPG) von der Pumpimpulsdauer (im Wellenleiter) für Volumen- und Wellenleiterstrukturen in periodisch gepoltem Lithiumniobat (PPLN);

Fig. 4 eine grafische Darstellung der Abhängigkeit des gemessenen Wirkungsgrades der optischen parametrischen Erzeugungsumwandlung (OPG) von der Pumpenergie;

Fig. 5 eine grafische Darstellung der gemessenen Signal- und Faulenzerwellenlängen bzw. (nacheilende Wellenlängen, nachstehend als "Idlerwellenlänge" bezeichnet) über der Pumpwellenlänge bei 100°C ;

Fig. 6 eine Ansicht einer Mehrfachwellenlängenausgabe unter Verwendung eines einzelnen Wellenleiters;

Fig. 7 eine Ansicht eines Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpuls-Erzeugungssystems;

Fig. 8 bis 10 Ansichten einer in der Oberfläche eines Substrats ausgebildeten optischen Verbindungsschaltermatrix zum Schalten von Impulsen aus einem oder beiden von zwei Wellenleitern auf einen Ausgabewellenleiter;

Fig. 11 eine Ansicht einer optischen Verbindungsschaltermatrix (OCSM), die in der Lage ist, in drei Wellenlängenumwandlungskanälen verlaufende ultrakurze optische Impulse in einem einzelnen Ausgabewellenleiter zu verbinden;

Fig. 12 eine Ansicht einer optischen Trennschaltermatrix (OSSM) zur selektiven Verteilung ultrakurzer optischer Impulse aus einer einzelnen Einzelwellenlängenimpulsquelle in drei Wellenlängenumwandlungskanäle;

Fig. 13 eine Ansicht einer optischen Trennschaltermatrix (OSSM) zur selektiven Verteilung ultrakurzer Impulse in drei Wellenlängenumwandlungskanäle unter Verwendung einer akustooptischen Vorrichtung; und

Fig. 14 eine Ansicht einer optischen Trennschaltermatrix (OSSM) zur selektiven Verteilung ultrakurzer Impulse in drei Wellenlängenumwandlungskanäle unter Verwendung einer elektrooptischen Vorrichtung.

Fig. 1 zeigt eine Übersichtsdarstellung eines Ultrakurzimpuls bereitstellenden Systems mit einer einstellbaren oder veränderlichen optischen Wellenlänge oder einer Vielzahl von Wellenlängen. Das System weist einen Ultrakurzimpuls-Laser (UPL) 10 zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse einer festen Wellenlänge und zumindest einen Wellenlängenumwandlungskanal (WCC) 12₁ bis 12_n auf.

Der UPL 10 kann ein Festmoden-Faserschallator sein, der optische Impulse im Pikosekunden- oder Femtosekundenbereich mit typischen Impulsenergien zwischen 10 pJ ($10 \cdot 10^{-12} \text{ J}$) bis 10 nJ ($10 \cdot 10^{-9} \text{ J}$) und typischen Durchschnittsleistungen zwischen $0,1 \text{ mW}$ bis 100 mW bereitstellt. Der Festmoden-Faserschallator kann in einer Vielzahl von möglichen Ausgestaltungen ausgebildet sein, wie sie in den vorstehend benannten Aufsätzen von Fernmann et al. beschrieben wurden. Aus den vorstehend hervorgehobenen Gründen ist es zu bevorzugen, daß der Faserschallator einen Allfaserhohlraum bzw. einen gänzlich mit Lichtleitfasern ausgefüllten Hohlraum ohne jegliche nichtfaserartige Streuungsvorrichtungen aufweist. Folglich beträgt die bevorzugte Betriebswellenlänge $1,55 \mu\text{m}$. Alternativ dazu kann der UPL 10 ein Festkörperlaser wie ein Titan-Saphir-Laser, ein Chrom-Forsterit-Laser, ein $\text{Cr} : \text{LiSaF}$ -Laser oder ein $\text{Cr} : \text{LiSGaF}$ -Laser sein.

Ein wichtiges Merkmal des in **Fig. 1** gezeigten Ausführungsbeispiels besteht darin, daß die Wellenlängenumwandlung in den WCCs in einem optischen Wellenleiter erfolgt. Die Verwendung einer nichtlinearen Umwandlung erlaubt wie vorstehend beschrieben bei der derzeit bekannten Anzahl nichtlinearer Materialien nicht die Ausführung optischer parametrischer Erzeugung unter Verwendung der verstärkten Ausgabe eines Festmoden-Faserlasers oder, all-

gemeiner, jeglichen anderen bekannten Festmoden-Ultrakurzimpuls-Lasers. Es wurde zum ersten Mal experimentell gezeigt, daß durch die Verwendung optischer parametrischer Erzeugung in speziell ausgestalteten Wellenleitern bei periodisch gepoltem Lithiumniobat (LiNbO_3) der OPG-Schwellenwert in den mit Ultrakurzimpuls-Oszillatoren zugänglichen Energiebereich verringert wird.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der parametrischen Erzeugung in einem Volumenkristall und in einem optischen Wellenleiter besteht darin, daß letzterer die Begrenzung des optischen Strahls auf einen kleinen Querschnittbereich ermöglicht und die Ausbreitung des optischen Strahls entlang der gesamten Wellenleiterlänge ohne Beugungsaufweitung erlaubt. Demgegenüber führt die Ausbreitung eines freien Strahls in dem Körper eines optischen Kristalls zu einer Beugungsaufweitung. Folglich führt eine erheblich höhere optische Intensität über eine lange Ausbreitungslänge für die gleiche optische Pumpleistung bei einem optischen Wellenleiter zu einer erheblich höheren optischen parametrischen Verstärkung verglichen mit einem Volumenkristall.

Weiterhin ist eine maximale Wechselwirkungslänge zwischen zwei oder mehr Ultrakurzimpulsen aufgrund verschiedener Gruppengeschwindigkeiten bei verschiedenen optischen Wellenlängen begrenzt. Diese maximale, durch Wegwanderung begrenzte Länge $l_{\text{walk off}}$ ist durch die Dauer des Impulses Δt und den Parameter v_{GVM} der Gruppengeschwindigkeits-Fehlanspassung (GVM) v_{GVM} eines optischen Materials bestimmt:

$$l_{\text{walk off}} = \Delta t / v_{\text{GVM}}$$

Der Vorteil der OPG in einem optischen Wellenleiter verglichen mit dem konfokal gebündelten Strahl im Inneren des gleichen nichtlinearen Materials (bei Entartung) kann quantitativ durch die nachstehende Formel ausgedrückt werden:

$$\frac{P_{\text{th, conf}}}{P_{\text{th, waveg.}}} = \frac{\lambda \cdot l_{\text{walk off}}}{2 \cdot n \cdot A_{\text{waveg.}}}$$

$P_{\text{th, conf.}}$ und $P_{\text{th, waveg.}}$ bezeichnen dabei die entsprechenden Schwellenwerte der Spitzenleistungen für Pumpimpulse in einem Volumenkristall und in einem Wellenleiter, λ und n bezeichnen die Signalwellenlänge und den Brechungsindex an der Entartungsgrenze und $A_{\text{waveg.}}$ bezeichnet die Querschnittsfläche des Wellenleiters. Höhere Schwellenwerte der Spitzenleistung erfordern höhere Pumpimpulsenergien. Daher ist der Vorteil der Verwendung eines optischen Wellenleiters verglichen mit einem Volumenkristall umgekehrt proportional zu der Impulsdauer. Es sei angemerkt, daß bei einem Volumenmaterial der OPG-Schwellenwert unabhängig von der Impulsdauer ist.

Wie vorstehend beschrieben wurde der niedrigste OPG-Schwellenwert bei einem Volumenkristall aus periodisch gepoltem Lithiumniobat (PPLN) erzielt. Daher ist PPLN das bevorzugte Material für einen Parameterwellenleiter, obwohl periodisch gepolte ferroelektrische optische Materialien wie PP-Lithiumtantalat, PP-MgO: LiNbO_3 , PP-KTP, oder andere periodisch gepolte Kristalle der KTP-Isomorphenfamilie können vorteilhaft verwendet werden. Die optischen Wellenleiter werden bevorzugt in einem PPLN-Substrat unter Verwendung einer bekannten Titaneindiffusions- (TI) oder Protonaustauschtechnik (PE) hergestellt (oder einer Verbindung aus beiden Techniken (TIPE)).

Fig. 2 zeigt einen bevorzugten Wellenleiteraufbau für die WCCs. Der optischen parametrischen Erzeugungstufe (OPG) 14 ist ein sich adiabatisch verjüngender Wellenleiter-Modenumwandlungsaufbau 16 vorangestellt, der durch einen in Abschnitte unterteilten Wellenleiter implementiert werden kann. Der Modenumwandler 16 kann eine ähnliche

Ausgestaltung aufweisen wie sie durch Chou et al. in "Adiabatically tapered periodic segmentation of channel waveguides for mode-size transformation and fundamental mode excitation"; Optics Letters, Bd. 21, Nr. 11; Juni 1996, beschrieben wurde. Da der OPG-Wellenleiter bei der längeren parametrischen Signalwellenlänge (bei diesem besonderen Ausführungsbeispiel bei $\approx 1,55 \mu\text{m}$) ein Monomodenwellenleiter ist, aber bei der kürzeren Pumpwellenlänge (bei diesem besonderen Ausführungsbeispiel bei 780 nm) ein Multimodenwellenleiter ist, ist die Verwendung des Modenumwandlers 16 vorteilhaft. Daher ist in einem derartigen Wellenleiter die Anregung einer einzelnen Grundschriftungsmoden mit der Pumpwellenlänge durch direkte Kopplung eines Pumpimpulses in den Wellenleiter schwierig. Hinsichtlich des Schwellenwerts, der Stabilität und der Umwandlungseffizienz kann die beste Leistung erzielt werden, wenn der Pumpimpuls zuerst in diese Modenumwandleröffnung 16 eingekoppelt wird, wo er in eine Grundschriftungsmoden umgewandelt und dann in einer transversalen Grundschriftungsmoden in den OPG-Abschnitt 14 eingekoppelt wird.

Fig. 3 zeigt die Abhängigkeit des theoretischen OPG-Energieschwellenwertes von der Pumpimpulsdauer (im Wellenleiter) für Volumen- (gepunktete Linie) und Wellenleiterstrukturen (durchgezogene Linie) aus PPLN. Der OPG-Energieschwellenwert wird unter Verwendung der vorstehend erwähnten Formel und den gemessenen 50 nJ OPG-Energieschwellenwert für Volumen-PPLN berechnet. Der für einen 2 ps langen Pumpimpuls experimentell gemessene Energieschwellenwert liegt bei $\approx 340 \text{ pJ}$, wie in Fig. 3 durch einen Punkt gezeigt ist. Der Schwellenwertpegel macht eine Verminderung von annähernd zwei Größenordnungen für diese spezielle Impulsdauer aus und zeigt, daß OPG mit Impulsdauern von Pikosekunden und Subpikosekunden ganz besonders in dem mit Festmodenlasern zugänglichen Energiebereich erzielt werden können. Ein Beispiel eines derartigen Faseroszillators ist in dem vorstehend genannten Artikel von Fermann et al. (Electronics Letters, Bd. 31, Nr. 3) angegeben, worin 6 bis 10 nJ Impulse mit 2 bis 4 ps Dauer beschrieben werden, was zur direkten Ansteuerung der Wellenleiter OPG-WCCs der Erfindung ausreicht.

Wie in Fig. 4 gezeigt, kann mit diesem Aufbau eine wirkungsvolle Energieumwandlung erzielt werden. Für Pumpenergien von annähernd dem vier- bis fünffachen des OPG-Schwellenwertes wurden maximale Umwandlungswirkungsgrade von $\approx 25\%$ erreicht.

Die umgewandelte optische Wellenlänge kann durch eine Temperaturabstimmung des Wellenleiters eingestellt werden (d. h., durch Steuerung der Temperatur der Substrate in welchen der Wellenleiter ausgebildet ist), wodurch eine Vielzahl optischer Wellenlängen mit einem einzelnen Wellenleiter zugänglich wird. Der OPG 14 ist imstande, gleichzeitig zwei verschiedene optische Wellenlängen zu erzeugen, von denen die kürzere mit "Signal" und die längere mit "Idler" (langsamere bzw. Faulenzer bzw.

nacheilende) bezeichnet wird. Daher ist ein einzelner WCC zur Erzeugung von zwei benötigten optischen Wellenlängen geeignet, indem die Pumpwellenlänge sowie das periodische Polungsintervall sorgfältig gewählt werden, so daß die Energieerhaltungs- und die Impulserhaltungsgesetze für alle drei optischen (Pump-, Signal- und Idler-) Wellenlängen erfüllt sind. Fig. 5 zeigt beispielsweise die gemessenen Signal- und Idlerwellenlängen über die Pumpwellenlänge bei einer Temperatur von 100°C und einer quasi phasengangepaßten (QPM) Gitterkonstanten von $15 \mu\text{m}$.

Es können weiterhin mit einem einzelnen, eine Vielzahl von Wellenleitern mit verschiedenen elektrisch gepolten Perioden aufweisenden Chip Mehrfachwellenlängen erreicht

werden, wie in **Fig. 1** gezeigt. Auf jede vorab entworfene Wellenlänge kann durch Verschiebung des Kristalls in transversaler Richtung zur Auswahl des benötigten Wellenleiters zugegriffen werden.

Jeder WCC weist optional zumindest einen Frequenzvervielfacher **HG 18** vor der OPG-Stufe **14** und zumindest einen Frequenzvervielfacher **HG 20** nach der PG-Stufe **14** auf. Allgemein erlaubt dies die Erzeugung kürzerer optischer Wellenlängen als die Wellenlänge des Festmodenlasers. Alle Wellenleiter können auf einem einzelnen Chip ausgebildet sein, wodurch das System vereinfacht und zusätzliche Kopplungsverluste im Wellenleiter beseitigt sind. Falls ein Pumpimpuls im freien Raum zunächst in einen Wellenleiter eines Frequenzvervielfachers eingekoppelt wird, der bei seiner Anfangswellenlänge in einer Monomode schwingt, beispielsweise bei 1550 nm, dann liegt der wellenlängenumgewandelte Strahl bei einer kürzeren Wellenlänge allgemein in einer Grundschwingungsmoden vor und kann direkt in die OPG-Stufe (auf demselben Chip) eingekoppelt werden. Adiabatisch verjüngte Modenumwandler können dann unnötig sein.

Ein Beispiel eines Aufbaus mit einem Mehrfachwellenlängenausgang unter Verwendung eines einzelnen Wellenleiters als WCC ist in **Fig. 6** gezeigt. Ultrakurzimpulse mit einer einzelnen Wellenlänge, beispielsweise ~1550 nm Impulse eines Faserlasers, werden in den Wellenleiter eingekoppelt, und ein spezieller Satz von Ultrakurzimpuls-Wellenlängen, beispielsweise ~680 nm, ~780 nm und ~915 nm werden innerhalb des Wellenleiters erzeugt und an einem Ausgang davon bereitgestellt. Besonders die 1550 nm-Impulse werden in einen Wellenleiter eingekoppelt, dessen erster Abschnitt einen zweiten Frequenzvervielfacher **60** bildet, der durch die korrekte PPLN-Periode (bei deren Gestaltung die genaue Geometrie des Wellenleiters in Betracht gezogen werden sollte) und die Temperatur des Wellenleitersubstrats umgesetzt wird. Wenn die 1,55 μ m-Eingabe eine Monomode ist, kann der Wellenleiter in allen Abschnitten die gleiche Breite aufweisen. Dann ist die erzeugte zweite harmonische Schwingung in der Grundschwingungsmoden. Die verdoppelte Ausgabe des Faserlasers bei ~780 nm wird weiter in den OPG-Abschnitt **62** des Wellenleiters zur gleichzeitigen Erzeugung von ~1360 nm als Signalwellenlänge und ~1830 nm als Idlerwellenlänge übertragen. Die spezifizierten Wellenlängen können gemäß den vorstehend beschriebenen Faktoren durch eine für den OPG-Abschnitt verwendete bestimmte PPLN-Periode erlangt werden. Diese beiden erzeugten Signal- und Idlerwellenlängen können getrennt voneinander in weiteren Abschnitten des Wellenleiters verdoppelt werden, wodurch jeweils 680 nm- und 915 nm-Wellenlängenimpulse bereitgestellt werden. Der verbleibende 780 nm-Pumpimpuls wird beispielsweise für Zweiphotonenmikroskopie zusammen mit diesen beiden Wellenlängen an den zu verwendenden Ausgang übertragen. Die letzten Stufen der Vorrichtung, welche Frequenzvervielfacher **64** und **66** zur OPG-Ausgabe aufweisen, können auf demselben Substrat, getrennt auf einem verschiedenen Substrat oder Substraten oder selbst unter Verwendung von Grundmaterial verwirklicht sein.

Ein allgemeines Ausführungsbeispiel eines Systems zur Erzeugung von Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpulsen ist in **Fig. 7** gezeigt. Das System zur Erzeugung und Steuerung einer Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpulsausgabe weist einen Ultrakurzimpuls-Laser (UPL) **10** zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse einer bestimmten Wellenlänge, einen optionalen Ultrakurzimpuls-Verstärker (UPA) **22** zur Steigerung von Leistung und Energie der Ultrakurzimpulse des UPL **10**, eine optische Trennschaltermatrix (OSSM) **24** zur Verteilung von Ultrakurzimpulsen in eine

Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen, zumindest einen und vorzugsweise eine Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen WCCs **12₁** bis **12_n**, von denen jeder eine parametrische Erzeugungsstufe (PG) **14** und optionale harmonische Oszillatorenstufen (HG) **18** und **20** aufweist, und eine optische Verbindungsschaltermatrix (OCSM) **26** am Ausgang des Systems zur Verbindung der Ausgänge einer Vielzahl von WCCs zur Schaffung eines einzelnen Ausgangsstrahls auf (wenn es nur einen WCC gibt, sind die OSSM und OCSM nicht nötig).

Wenn die durch einen Festmodenfaseroszillator direkt erzeugte Impulsenergie zur Ansteuerung der Wellenleiter-WCCs unzureichend ist, kann die Laserausgabe in einem Ultrakurzimpuls-Verstärker UPA **22** verstärkt werden. Ein derartiger Verstärker ist vorzugsweise ein Faserverstärker. Von großer Bedeutung ist, daß die zum Betreiben der Wellenleiter-WCCs benötigte niedrige Energie es erlaubt, eine relativ einfache Faserverstärkergestaltung zu verwenden. Impulse im Bereich von 1 bis 10 nJ und höher können entweder direkt oder durch Verwendung kompakter und einfacher Bauarten der gechirpten Impulsverstärkung (Chirp = dynamische Wellenlängenveränderung) erzielt werden, welche auf gechirpten Fasergittern oder gechirpten PPLN-Komprimierern basiert, wie sie durch Galvanauskas et al. in "Use of Chirped-Period-Poled Lithium Niobate for Chirped Pulse Amplification in Optic Fibers"; Ultrafast Optics 1997, Monterey CA; August 1997, beschrieben sind.

Die optische Verbindungsschaltermatrix (OCSM) **26** ist in der Lage, eine spezielle Laserquelle aus einer Vielzahl von WCCs auszuwählen. Eine konzeptionelle Draufsicht einer grundlegenden OCSM, die in einer Oberfläche eines ferroelektrischen Substrats (z. B. PPLN) ausgebildet ist, ist in **Fig. 8** gezeigt. Die grundlegende OCSM ist in der Lage, Impulse der Wellenlänge λ_1 von dem Wellenleiter **30** bzw. Impulse der Wellenlänge λ_2 von dem Wellenleiter **32** in einen Hauptverbindungswellenleiter **34** (als Ausgang) zu schalten. Wie vorstehend beschrieben, ist das Substrat vorzugsweise aus einem ferroelektrischen Material wie Lithiumniobat oder Lithiumtantalat ausgebildet. Die optischen Wellenleiter werden unter Verwendung von Titaneindiffusion (TI) oder Protonenaustausch (PE) oder einer Kombination daraus (TIPE) hergestellt. Die optischen Schalter werden hergestellt, indem bestimmte Bereiche der beiden optischen Wellenleiter hinreichend nahe zusammen gebracht werden, so daß das Laserlicht von einem Wellenleiter zum anderen geschaltet werden kann.

Wie in **Fig. 9** gezeigt, werden die Ultrakurzimpulse in den Wellenleitern **30** und **32** ohne äußeres elektrisches Feld nicht auf den Hauptverbindungswellenleiter **34** geschaltet und sie breiten sich weiter in den Wellenleitern **30** und **32** bis zu den optischen Endanschlüssen aus. Das Anlegen spezifischer elektrischer Spannungen verursacht eine vollständige Einkopplung der Ultrakurzimpulse der Wellenleiter **30** bzw. Wellenleiter **32** in den Hauptverbindungswellenleiter **34**. Wie in **Fig. 10** gezeigt, werden die ultrakurzen Lichtimpulse in dem Wellenleiter **32** in den Hauptverbindungswellenleiter **34** eingekoppelt, indem beispielsweise eine Spannung V_2 an den Zwischenraum zwischen den beiden Wellenleitern angelegt wird. Zum Anlegen der jeweiligen elektrischen Felder zwischen die Wellenleiter **30** und **32** und den Hauptverbindungswellenleiter **34** können optische Richtungskoppler **36** und **38** verwendet werden, wie die in Amnon Yariv: "Introduction to Optical Electronics", S. 391-395, Holt, Rinehart and Winston, 1976, beschriebenen. Der Hauptverbindungswellenleiter **34** wird vorzugsweise unter ausschließlicher Verwendung des TIPE-Vorgangs hergestellt. Dies ermöglicht für die vielen Ultrakurzimpulse eine relativ wirksame Ausbreitung durch den Hauptverbindungs-

dungswellenleiter 34 und schafft daher einen gemeinsamen Anschluß für alle WCCs.

Fig. 11 zeigt eine veranschaulichende Draufsicht des in Fig. 7 gezeigten OCSM 26. Die in Fig. 11 gezeigte OCSM ist in der Lage, drei WCCs zu handhaben, obwohl die OCSM zur Handhabung einer beliebigen Anzahl WCCs gemäß den in Fig. 11 verdeutlichten Grundsätzen entworfen sein kann. Die OCSM 26 weist drei optische Richtungskoppler 40, 42 und 44 auf, welche aus einem ferroelektrischen Material ausgebildet sind. Die optischen Hauptwellenleiter 48, 52 und 56 der drei WCCs werden unter Verwendung der Titaneindiffusion (TI) hergestellt. Der 500 nm-Ultrakurzimpuls ausbreitende Wellenleiter 48 eines ersten WCC bildet den mittleren Eingabewellenleiter mit einem Brechungsindex n_1 . Im Auszustand (keine Spannung angelegt) breitet sich der 500 nm-Ultrakurzimpuls weiter in dem Wellenleiter 48 aus (der der mittlere Abschnitt des Ausgabewellenleiters 46 wird). Durch Anlegen einer Spannung V1 werden die 500 nm-Ultrakurzimpulse auf einen Laserausgabebeschluß 50 geschaltet und absorbiert. Innerhalb des Ausgabewellenleiters 46 neigen die 500 nm-Impulse dazu, sich vor allem in dem Bereich mit dem Brechungsindex n_1 auszubreiten, wodurch ein hohes Ausmaß an Monomodebetrieb bewahrt wird.

Ein zweiter WCC-Wellenleiter 52, welcher Impulse mit einer Wellenlänge von 780 nm bereitstellt, ist an den Ausgabewellenleiter 46 durch den zweiten hybriden optischen Richtungskoppler 42 gekoppelt. Im Auszustand werden die 780 nm-Ultrakurzimpulse in einen optischen Endanschluß 54 ausgegeben. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung V2 können die 780 nm-Ultrakurzimpulse auf den Ausgabewellenleiter 46 mit dem hybriden TIPE-Wellenleiter des Brechungsindex n_2 geschaltet werden. Die 780 nm-Impulse breiten sich vor allem innerhalb des Abschnitts des Ausgabewellenleiters mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 aus, wodurch ein hohes Ausmaß an Monomodebetrieb bewahrt wird (d. h., die kombinierte Querschnittsfläche der n_1 - und n_2 -Bereiche stimmt mit der Monomodeausbreitung für 780 nm-Ultrakurzimpulse überein).

Das OCSM 26 weist außerdem einen weiteren hybriden optischen Richtungskoppler 44 und einen zusätzlichen TIPE-Wellenleiterabschnitt des Ausgabewellenleiters 46 mit dem Brechungsindex n_3 auf, wobei $n_1 > n_2 > n_3$ gilt. Die Wirkung dieses zusätzlichen TIPE-Wellenleiterabschnitts liegt darin, die Ausbreitung der 980 nm-Wellenleiterimpulse innerhalb des Ausgabewellenleiters 46 zu ermöglichen. Speziell die 980 nm-Impulse breiten sich vor allem über die n_1 -, n_2 - und n_3 -Bereiche aus, wobei die kombinierte Querschnittsfläche der n_1 -, n_2 - und n_3 -Bereiche mit der Monomodeausbreitung der 980 nm-Ultrakurzimpulse übereinstimmt. Falls keine Spannung an den dritten Richtungskoppler 44 angelegt ist, werden die sich in dem Wellenleiter 56 ausbreitenden Ultrakurzimpulse in einen optischen Endanschluß 58 ausgegeben. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung V3 an den hybriden optischen Richtungskoppler werden die 980 nm-Wellenlängenimpulse in den gemeinsamen hybriden Ausgabebeschluß 46 geleitet.

Obwohl der Einfachheit halber der Ausgabewellenleiter 46 in Fig. 11 so dargestellt ist, als hätte er getrennte Bereiche für die Brechungsindizes n_1 , n_2 und n_3 , ist es so aufzufassen, daß sich der Brechungsindex gradientenartig über die Breite des Ausgabewellenleiters 46 verändert, d. h., es gibt keine "Stufe" im Brechungsindex zwischen den Bereichen n_1 und n_2 und den Bereichen n_2 und n_3 . Außerdem sind die n_1 -, n_2 - und n_3 -Bereiche als im Substrat nebeneinander liegend aufzufassen, beispielsweise müssen die beiden n_2 -Bereiche nicht jeweils ein sich unter und um den n_1 -Bereich erstreckender einzelner Bereich sein.

Die optischen Richtungskoppler sind vorzugsweise hybrid, da die TIPE-Wellenleitertechnik hier verwendet wird. Die Verwendung von TIPE-Wellenleitern unterstützt die Fähigkeit, alle drei Wellenlängenquellen zum Austritt aus dem Substrat durch einen gemeinsamen Anschluß zu verbinden, wobei alle Wellenlängen im Quasimonomodebetrieb verbleiben können. Wie man sieht, wird die Komplexität der Vorrichtung erheblich erhöht, so daß sich die Mehrfachwellenlängen entlang eines einzelnen Wellenleiters ausbreiten können und dennoch in Monomode sind. Falls die Wellenlängen nahe genug beieinander sind, wird ein einzelner Wellenleiter für jeden Monomode sein.

Die in Fig. 11 gezeigte OCSM 26 kann zur Verbindung einer beliebigen Anzahl von WCCs ausgedehnt werden, lediglich durch die Größe des Substratmaterials begrenzt. Mit der Verfügbarkeit von 4-Zoll Lithiumniobatwafern ist es möglich, bis zu zehn verschiedene WCCs zu verbinden. Mit einer steigenden Zahl von WCCs wird die Gestaltung der vielen TIPE-Wellenleiterabschnitte kritischer.

Die vorstehende Beschreibung bezieht sich auf die Verbindung von Signalimpulsen, die in jedem der WCCs empfangen werden. Dasselbe Prinzip kann genauso gut auf das Schalten des Idlersignals in jedem der WCCs ausgedehnt werden.

Es wird angemerkt, daß alternativ zu der vorstehend beschriebenen neuen OCSM 26 die verbindende Wirkungsweise unter Verwendung bekannter Vorrichtungen durchgeführt werden kann, welche außerhalb des integrierten optischen Chips sind. Es gibt beispielsweise eine Anzahl bekannter Einrichtungen zur Verbindung mehrerer Wellenlängen in einem gemeinsamen Strahlengang. Diese Einrichtungen wurden in WDM-Systemen verwendet. Die einfachste Einrichtung ist eine Reihe dichroitischer Spiegel. Ein weiterer Ansatz besteht in der Verwendung eines Faser-WDM. Allgemein kann die OCSM 26 der Erfindung ein beliebiges Verfahren anwenden, welches in WDM-Systemen zur Verbindung verschiedener Wellenlängen verwendet wird.

Der Aufbau der optischen Trennschaltmatrix (OSSM) 24 gemäß Fig. 7 ist verallgemeinert in Fig. 12 gezeigt. Die OSSM 24 speist direkt Ultrakurzimpulse (beispielsweise 1,55 μm) des UPL 10 in einen beliebigen oder mehrere der WCCs ein. Die Steuerung der Ultrakurzimpulse aus dem Eingabebeschluß der OSSM 24 zu einem beliebigen WCC wird entweder unter Verwendung eines elektrooptischen oder des akustooptischen Verfahrens ausgeführt, wie nachstehend beschrieben wird.

Fig. 12 zeigt die Verwendung eines optischen 1×3 -Richtungskopplers 60 zur Verteilung der Eingangsstrahlung zu einem beliebigen oder allen Ausgabebeschlüssen. Die Impulse mit 1,55 μm Wellenlänge werden in einen optischen Wellenleiter eingespeist, welcher durch TI, PE oder TIPE auf einem ferroelektrischen Substrat wie Lithiumniobat oder Lithiumtantalat hergestellt ist. Alle Wellenleiter weisen dieselbe Breitenquerschnittsfläche auf, die zur Monomodeausbreitung mit der Quellenwellenlänge gestaltet ist. Die Bedingung für den Trennungsvorgang wird geregelt, indem Spannungen V1 oder V2 an den optischen 1×3 -Richtungskoppler 60 angelegt werden. In den WCCs können geeignete Modenumwandler 16 zur Sicherstellung einer optimierten Vorrichtungsarbeitsweise verwendet werden, d. h., minimale Überschußverluste und hoher Wirkungsgrad der Wechselwirkung in den WCCs (vgl. Fig. 2). Die an die 1×3 -OSSM angelegte Schaltspannung kann mit dem vorstehend beschriebenen Schaltvorgang der OCSM 26 synchronisiert werden. Die in Fig. 12 gezeigte OSSM 24 kann unter Verwendung elektroakustisch oder elektrooptisch aktiver Schalter verwirklicht werden. Es ist ebenfalls möglich, wellenlängengeführte optische Gitter zur Verwirklichung dieser

OSSM zu verwenden.

Fig. 13 zeigt eine neue auf akustischen Oberflächenwellen (SAWs) basierende Verwirklichung einer 1×3 -OSSM, wobei die SAWs durch die interdigitalen Wandler IDT1 70 und IDT2 72 erzeugt werden. Wie in **Fig. 13** gezeigt ist, werden die IDT1 70 und IDT2 72 auf der Substratoberfläche angeordnet. Die mit Δn_1 , Δn_2 und Δn_3 bezeichneten optischen Wellenleiterbereiche weisen einen leicht höheren Index als der optische Basis- 1×3 -Wellenleiteraufbau auf. Das Substratmaterial ist vorzugsweise ferroelektrisch mit unter Verwendung der TI hergestellten Wellenleitern. Die Wellenleiterbereiche mit einem leicht höheren Index sind unter Verwendung des PE hergestellt. Der Brechungsindexwechsel kann durch geeignetes Ausheilen minimiert werden, wie es durch diesen Aufbau erforderlich ist. Wenn an die interdigitalen Wandler keine elektrischen Signale angelegt werden, wird der Strahlengang des $1,55 \mu\text{m}$ -Laserlichts geradeaus in den mittleren Ausgabeanschluß der 1×3 -OSSM geführt. Wenn eine Spannung V1 an den IDT 70 angelegt wird, lenken die erzeugten akustischen Oberflächenwellen das $1,55 \mu\text{m}$ -Laserlicht in den ersten (z. B. oberen) Ausgabeanschluß der 1×3 -Struktur ab. Genauso wird der $1,55 \mu\text{m}$ -Ultrakurzimpuls in den dritten (z. B. unteren) Ausgabeanschluß der 1×3 -Wellenleiterstruktur abgelenkt, wenn eine Spannung V2 an den IDT2 72 angelegt wird. Richtung und Ausmaß der Ablenkung des Eingabeimpulses hängt sowohl von den angelegten Spannungen als auch den Werten Δn ab. Die Anordnung der IDTs auf der Substratoberfläche kann zur Verbesserung des Wirkungsgrades optimiert werden. Mit einem derartigen Aufbau können Wirkungsgrade über 90% verwirklicht werden. Die Einspeiseverluste werden durch den Δn -Aufbau minimiert.

Für eine gleichmäßige Verteilung der Eingabelaserstrahlung in alle drei Ausgabeanschlüsse der 1×3 -OSSM können die Δn 's der drei hybriden Wellenleiterbereiche durch kürzere Ausheilzeiten oder längere PE-Zeiten erhöht werden. In dieser Betriebsart werden beide an die OSSM angelegte Spannungen V1 und V2 zur Optimierung des gleichmäßigen Trennvorgangs benötigt.

Anstelle der Verwendung einer akustooptischen Vorrichtung zur Ablenkung des Eingangsimpulses kann der Schaltungsvorgang unter Verwendung eines elektrooptisch induzierten Gitters (EOG) umgesetzt werden, indem ein Paar vergitterte metallische Elektroden auf den ferroelektrischen Substraten verwendet werden. **Fig. 14** zeigt eine neue Verwirklichung einer derartigen 1×3 -OSSM. Die optische 1×3 -Wellenleitervorrichtung und die Lage der drei Bereiche mit einem geeigneten höheren Δn ist ähnlich zu dem, was hinsichtlich der akustooptisch basierten 1×3 -OSSM beschrieben und in **Fig. 13** gezeigt ist. Durch Anlegen einer Spannung V1 an das EOG1 80 wird ein periodischer Brechungsindexwechsel bewirkt, der ähnlich dem durch den IDT gemäß **Fig. 13** erzeugten ist. Das Intervall der metallischen elektrooptisch induzierten Gitterstruktur ist derart gestaltet, daß der $1,55 \mu\text{m}$ -Impuls auf den ersten (z. B. oberen) Ausgabeanschluß der 1×3 -Wellenleitervorrichtung geschaltet wird. Falls keine Spannung angelegt ist, wird der $1,55 \mu\text{m}$ -Eingabeimpuls direkt in den mittleren Anschluß der 1×3 -OSSM-Vorrichtung weiter geleitet. Falls eine Spannung V2 an das EOG2 82 angelegt wird, wird der eintreffende $1,55 \mu\text{m}$ -Eingabeimpuls geeignet auf den dritten (z. B. unteren) Ausgabeanschluß der 1×3 -Vorrichtung geschaltet. Die Brechungsindexwechsel der drei hybriden Wellenleiterstrukturen in der 1×3 -OSSM können erhöht werden, damit ein gleichmäßiges Aufteilen der eintreffenden Pumplaserstrahlung in die drei Ausgabeanschlüsse ermöglicht wird. Dann werden beide EOGs 80 und 82 zur Optimierung der Aufteilung verwendet. Die hier beschriebenen akustooptischen und elektroop-

tischen Vorrichtungen können beispielsweise jene sein, die zum Schalten in Telekommunikationsschaltungen verwendet werden. Natürlich können auch andere Schalteinrichtungen für integrierte optische Schaltungen der Telekommunikationsanwendungen verwendet werden.

Wie für die OCSM vorstehend beschrieben wurde, kann sich die OSSM von einer 1×3 - bis zu einer 1×10 -Struktur erstrecken. Die kritische Grenze wird auch hier von den Abmessungen des ferroelektrischen Wafers gebildet. Bei einem größeren Element als die 1×3 -OSSM können die hybriden PE-Abschnitte durch mehrfache PE-Vorgänge zum Ausgleich höherer Aufteilungsverluste bei größeren Teilungswinkeln verwirklicht werden, wie es durch den gesamten OSSM-, WCC- und OCSM-Aufbau erforderlich ist. Die OSSM 24, WCCs und OCSM 26 sind vorzugsweise auf einem einzelnen Substrat ausgebildet.

Der spezielle Aufbau der Mehrfachwellenlängenquelle hängt sehr stark von der Anwendung ab. Eine Mehrfachwellenlängenquelle in einem System erhöht die Möglichkeiten des Systems sehr vielfältig. Eine Anwendung für die Mehrfachwellenlängenquelle stellt eine RGB-Quelle für eine kommerzielle Anzeige oder Druckanwendungen dar. Besonders eine OPG-Wellenleitervorrichtung kann zur gleichzeitigen oder getrennten Umwandlung der ultraschnellen Impulse in rote, grüne und blaue Wellenlängen verwendet werden. Die integrierte optische Schaltung der vorstehend beschriebenen Art kann außerdem diesen Schalterschaltkreis zum An- oder Abschalten der Farben für die Abbildung beinhalten. Die ultraschnellen Impulse bieten den Vorteil, daß die mit hoher Spitzenleistung und großer Bandbreite bei jeder Farbe erzielte effiziente Umwandlung die von dem Laser stammende Fleckigkeit minimiert (Fleckigkeit läßt das Bild für das Auge körnig erscheinen).

Optische Kohärenztomographie (OCT) wurde als Medizin- bzw. Augenabbildungshilfsmittel entwickelt. Es ist in der Lage, Licht zur Abbildung durch menschliches Gewebe hindurch zu verwenden, von dem Licht stark gestreut wird. Es wurde nachgewiesen, daß die OCT Bilder mit einer besseren Auflösung als andere medizinische Abbildungsverfahren wie MRI, Computertomographie oder Ultraschall liefert. Die axiale Auflösung liegt bei $10 \mu\text{m}$ und kann auf $2 \mu\text{m}$ reduziert werden, wenn eine Lichtquelle einer kurzen Kohärenzlänge wie ein Femtosekunden-Laser verwendet wird. Die Abbildungstiefe ist jedoch auf 3 mm begrenzt. Eine erwünschte Eigenschaft des OCT ist, daß es eine einfache und billige Lichtquelle wie eine Superleuchtdiode verwenden kann. Es wird jedoch eine bessere Leistungsfähigkeit durch die Verwendung eines Festmodenlasers erzielt. Beispielsweise bei der Abbildung am lebenden Objekt bei dem Herz eines Froschembryos benötigt es 20 s bis zum Erhalt eines Bildes, wenn eine Superleuchtdiode verwendet wird, aber lediglich 0,25 s, wenn ein Festmodenlaser verwendet wird, was es den Forschern ermöglicht, die Bewegung des schlagenden Herzens während den diastolischen und den systolischen Phasen festzuhalten. Für diese schnelle Abbildung kann eine Schnellabtastung (2000 Hz) angewendet werden. Sowohl Titan-Saphir-Festmodenlaser als auch Chrom-Forsterit-Festmodenlaser wurden für die OCT verwendet. Chrom-Forsterit ist wegen seiner Wellenlänge (1300 nm) besonders gut zur Abbildung bei biologischen Geweben geeignet; bei größeren Wellenlängen werden Streueffekte reduziert, welche die Abbildungstiefe begrenzen. Da das Verfahren kompatibel mit der Fasertechnik ist, wurde es erfolgreich bei der Endoskopie verwendet. Wie durch Tearney et al. in "Rapid acquisition of in vivo biological images by use of optical coherence tomography", Optics Letters, Bd. 21, Nr. 17, September 1995, berichtet wird, wurde eine radial abtastende Katheterendoskopsonde mit

schneller Abbildung vorgestellt. OCT wurde in einer Anzahl von klinischen und erforschenden Experimenten vorgestellt, u. a. bei der Krebsuntersuchung der menschlichen Magenwand, bei der Suboberflächenabbildung und Histologie der Speiseröhrenwand des Schweins, bei der Durchführung optischer Biopsie zur Ersetzung der entfernenden Biopsie und bei der Abbildung von Blutdurchflußgeschwindigkeiten unter Verwendung der Farbverdopplungs-OCT (CDOCT). Verbunden mit einer Katheter-, endoskopischen oder laparoskopischen Zuführung verspricht die OCT die Projektierung und Diagnose eines breiten Bereichs von Krankheiten zu ermöglichen, inklusive karzinogenen und präkarzinogenen Gewebeveränderungen, ohne dabei eine entfernende Biopsie und histologische Verfahren zu benötigen. In Verbindung mit herkömmlicher Mikroskopie ermöglicht die OCT die Abbildung innerer Strukturen bei lebenden Exemplaren ohne eine Opferrung und Histologie zu benötigen.

Daher ist für das Gebiet der OCT-Abbildung im menschlichen Gewebe eine 1,3 µm Laserquelle erwünscht. Ein mit Erbium dotierter Laser, der mit einer OPG-Wellenleitervorrichtung auf 1,3 µm umgewandelt wird, wäre für diese Anwendung geeignet.

Wie vorstehend beschrieben weist ein Mehrfachwellenlängen-Ultrakurzimpuls-Lasersystem eine Ultrakurzimpulse einer festen Wellenlänge erzeugende Laserquelle 10 und zumindest eine bzw. vorzugsweise eine Vielzahl von Wellenlängenumwandlungskanälen 12₁-12_n auf. Das Faserlasersystem wird bevorzugt zur Erzeugung von Ultrakurzimpulsen einer einzelnen Wellenlänge verwendet. Eine optische Trennschaltmatrix 24 richtet die Impulse der Laserquelle in zumindest einen der Wellenlängenumwandlungskanäle 12₁-12_n. Eine optische Verbindungsschaltmatrix 26 wird oberhalb der Wellenlängenumwandlungskanäle 12₁-12_n angeordnet und verbindet die Ausgaben der unterschiedlichen Wellenlängenumwandlungskanäle 12₁-12_n in einem einzelnen Ausgabekanal. In einem ferroelektrischen Substrat durch Titaneindiffusion (TI) bzw. Protonaustausch (PE) ausgebildete Wellenleiter bilden vorzugsweise die Wellenleiterumwandlungskanäle 12₁-12_n und die Trennungs- und Verbindungsmatrizen 24 und 26. Die Verwendung des Wellenleiters erlaubt das Auftreten einer wirksamen optischen parametrischen Erzeugung 14 in den Wellenlängenumwandlungskanälen 12₁-12_n bei Impulsenergien, die über eine Festmodenlaserquelle verfügbar sind. Das Mehrfachwellenlängen-Lasersystem kann eine Vielzahl von verschiedenen Einzelwellenlängen-Lasersystemen ersetzen. In seiner einfachsten Ausführung kann das System zur Umwandlung der Laserwellenlänge in eine günstigere Wellenlänge verwendet werden. Bei 1,55 µm durch einen Festmodenerbiumfaserlaser erzeugte Impulse können beispielsweise zu 1,3 µm für eine Verwendung bei der optischen Kohärenztomographie oder in für die Verwendung in einem Anzeige-, Druck- oder Formgebungssystem geeignete Wellenlängen werden.

Patentansprüche

1. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz zum Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse mit einer Ultrakurzimpulsquelle (10) zum Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse; und einem Wellenlängenumwandlungskanal (12) zum Umwandeln einer Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse in eine andere Wellenlänge, mit einem optischen Wellenleiter, der einen optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt (14, 62) zur parametrischen Erzeugung der ultrakurzen optischen Impulse der anderen Wellenlänge aufweist.

2. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 1, zudem mit einem Modenumwandler (16) zum Einkoppeln von Eingangslicht in den optischen Wellenleiter.

3. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 2, wobei der Modenumwandler einen sich adiabatisch verjüngenden Wellenleiter aufweist.

4. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 2, wobei der Modenumwandler eine innerhalb des optischen Wellenleiters angeordnete zweite Oberschwingungserzeugungsvorrichtung (20) aufweist.

5. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 1, wobei der optische Wellenleiter in einem ein periodisch gepoltes ferroelektrisches optisches Material aufweisenden Substrat ausgebildet ist.

6. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 5, wobei das periodisch gepolte ferroelektrische optische Material entweder aus Lithiumniobat, aus Lithiumtantalat, aus MgO : LiNbO₃, aus KTP oder aus Kristallen der KTP-Isomorphenfamilie ist.

7. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 1, wobei der Wellenlängenumwandlungskanal die Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse zumindest in Abhängigkeit von entweder der Temperatur des Wellenlängenumwandlungskanals, oder der Wellenlänge des in den Wellenlängenumwandlungskanal gepumpten Lichts, oder dem periodischen Polungsintervall des elektrischen Feldes in dem Wellenlängenumwandlungskanal umwandelt.

8. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 1, wobei die Ultrakurzimpulsquelle ein Festmodenfaserlaser ist.

9. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 8, wobei der Festmodenfaserlaser ein Erbium-dotierter Faserlaser ist.

10. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 1, wobei die Ultrakurzimpulsquelle ein Ti : Saphir-Laser, ein Cr : Forsterit-Laser, ein Cr : LiSaF-Laser oder ein Cr : LiSGaF-Laser ist.

11. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 1, wobei der Wellenlängenumwandlungskanal weiterhin zumindest eine Oberschwingungserzeugungsvorrichtung (18, 20, 60, 64, 66) zum Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse aufweist, deren Wellenlänge kürzer als die Wellenlänge der durch die Ultrakurzimpulsquelle erzeugten ultrakurzen optischen Impulse ist.

12. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 1, zudem mit einem in Signalflußrichtung oberhalb des Wellenlängenumwandlungskanals angeordneten Ultrakurzimpuls-Verstärker zur Verstärkung der ultrakurzen optischen Impulse.

13. Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz nach Anspruch 12, wobei der Ultrakurzimpuls-Verstärker ein Erbium-Faserverstärker ist.

14. System mit einer Farbbilderzeugungsvorrichtung; und einem Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz zum Zuführen von Bilddaten an die Farbbilderzeugungsvorrichtung in Gestalt von roten, grünen und blauen ultrakurzen optischen Impulsen, wobei das Ultrakurzimpulserzeugungsgesetz versehen ist mit einer ultrakurze optische Impulse erzeugenden Ultrakurzimpulsquelle; einem ersten Wellenlängenumwandlungskanal zum Umwandeln der Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse zur Erzeugung eines roten ultrakurzen optischen Impulses; einem zweiten Wellenlängenumwandlungskanal zum Umwandeln der Wellenlänge der ultrakurzen optischen

Impulse zur Erzeugung eines blauen ultrakurzen optischen Impulses; und
 einem dritten Wellenlängenumwandlungskanal zum Umwandeln der Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse zur Erzeugung eines grünen ultrakurzen optischen Impulses.

15. System nach Anspruch 14, wobei der erste Wellenlängenumwandlungskanal einen optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt beinhaltet, der die roten ultrakurzen optischen Impulse parametrisch erzeugt, der zweite Wellenlängenumwandlungskanal einen optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt beinhaltet, der die blauen ultrakurzen optischen Impulse parametrisch erzeugt, und der dritte Wellenlängenumwandlungskanal einen optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt beinhaltet, der die grünen ultrakurzen optischen Impulse parametrisch erzeugt.

16. System nach Anspruch 14, wobei jeder der ersten, zweiten und dritten Wellenlängenumwandlungskanäle einen Wellenleiter aufweist, der in einem ein periodisch gepoltes ferroelektrisches optisches Material aufweisendes Substrat ausgebildet ist.

17. System nach Anspruch 16, wobei das periodisch gepolte ferroelektrische optische Material entweder aus Lithiumniobat, aus Lithiumtantalat, aus $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$, aus K¹P oder aus Kristallen der K¹P-Isomorphenfamilie ist.

18. System nach Anspruch 14, wobei die Ultrakurzimpulsquelle ein Festmodenlaser ist.

19. System nach Anspruch 14, wobei die Ultrakurzimpulsquelle entweder ein Ti : Saphir-Laser, ein Cr : Forsterit-Laser, ein Cr : LiSaF-Laser oder ein Cr : LiS-GaF-Laser ist.

20. Ultrakurzimpulserzeugungsgerät nach Anspruch 14, wobei die Ultrakurzimpulsquelle ein Festmodenfaserlaser ist.

21. Ultrakurzimpulserzeugungsgerät nach Anspruch 14, wobei der Festmodenfaserlaser ein Erbium-dotierter Faserlaser ist.

22. System mit einer Farbbilderzeugungsvorrichtung; und einem Ultrakurzimpulserzeugungsgerät zum Zuführen von Bilddaten an die Farbbilderzeugungsvorrichtung in Gestalt von roten, grünen und blauen ultrakurzen optischen Impulsen, wobei das Ultrakurzimpulserzeugungsgerät versehen ist mit einer ultrakurzen optischen Impulse erzeugenden Ultrakurzimpulsquelle;

einer optischen Pumpvorrichtung zur Erzeugung von Pumpimpulsen mit der Pumpwellenlänge; und einem optischen Wellenleiter zur Umwandlung der Wellenlänge der ultrakurzen optischen Impulse in rote, grüne und blaue Wellenlängen, wobei der optische Wellenleiter versehen ist mit

einem ersten Oberschwingungserzeugungsabschnitt, der in Reaktion auf die ultrakurzen optischen Impulse ultrakurze optische Oberschwingungsimpulse bei einer Oberschwingungswellenlänge erzeugt;

einem optischen parametrischen Erzeugungsabschnitt, der in Reaktion auf die ultrakurzen optischen Oberschwingungsimpulse und die Pumpimpulse ultrakurze optische Signalimpulse bei einer Signalwellenlänge und ultrakurze optische Idlerimpulse bei einer Idlerwellenlänge parametrisch erzeugt;

einem zweiten Oberschwingungserzeugungsabschnitt, der in Reaktion auf die ultrakurzen optischen Signalimpulse die blauen ultrakurzen optischen Impulse erzeugt; und

einem dritten Oberschwingungserzeugungsabschnitt, der in Reaktion auf die ultrakurzen optischen Idlerimpulse die roten ultrakurzen optischen Impulse erzeugt, wobei der optische Wellenleiter die grünen ultrakurzen optischen Impulse mit der Pumpwellenlänge überträgt.

23. System nach Anspruch 22, wobei der optische Wellenleiter in einem ein periodisch gepoltes ferroelektrisches optisches Material aufweisendes Substrat ausgebildet ist.

24. System nach Anspruch 23, wobei das periodisch gepolte ferroelektrische optische Material entweder aus Lithiumniobat, aus Lithiumtantalat, aus $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$, aus KTP oder aus Kristallen der KTP-Isomorphenfamilie ist.

25. System nach Anspruch 22, wobei die Ultrakurzimpulsquelle ein Festmodenlaser ist.

26. System nach Anspruch 22, wobei die Ultrakurzimpulsquelle entweder ein Ti : Saphir-Laser, ein Cr : Forsterit-Laser, ein Cr : LiSaF-Laser oder ein Cr : LiS-GaF-Laser ist.

27. Ultrakurzimpulserzeugungsgerät nach Anspruch 22, wobei die Ultrakurzimpulsquelle ein Festmodenfaserlaser ist.

28. Ultrakurzimpulserzeugungsgerät nach Anspruch 22, wobei der Festmodenfaserlaser ein Erbium-dotierter Faserlaser ist.

Hierzu 12 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

FIG. 1

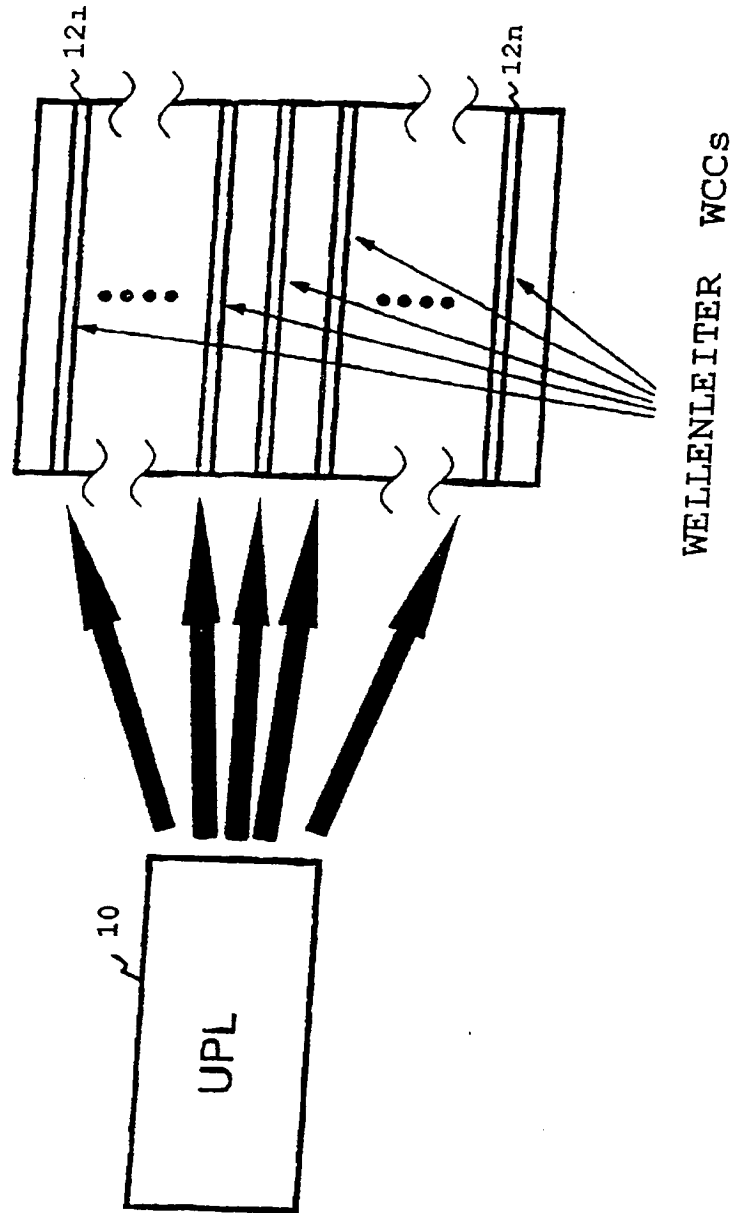


FIG. 2

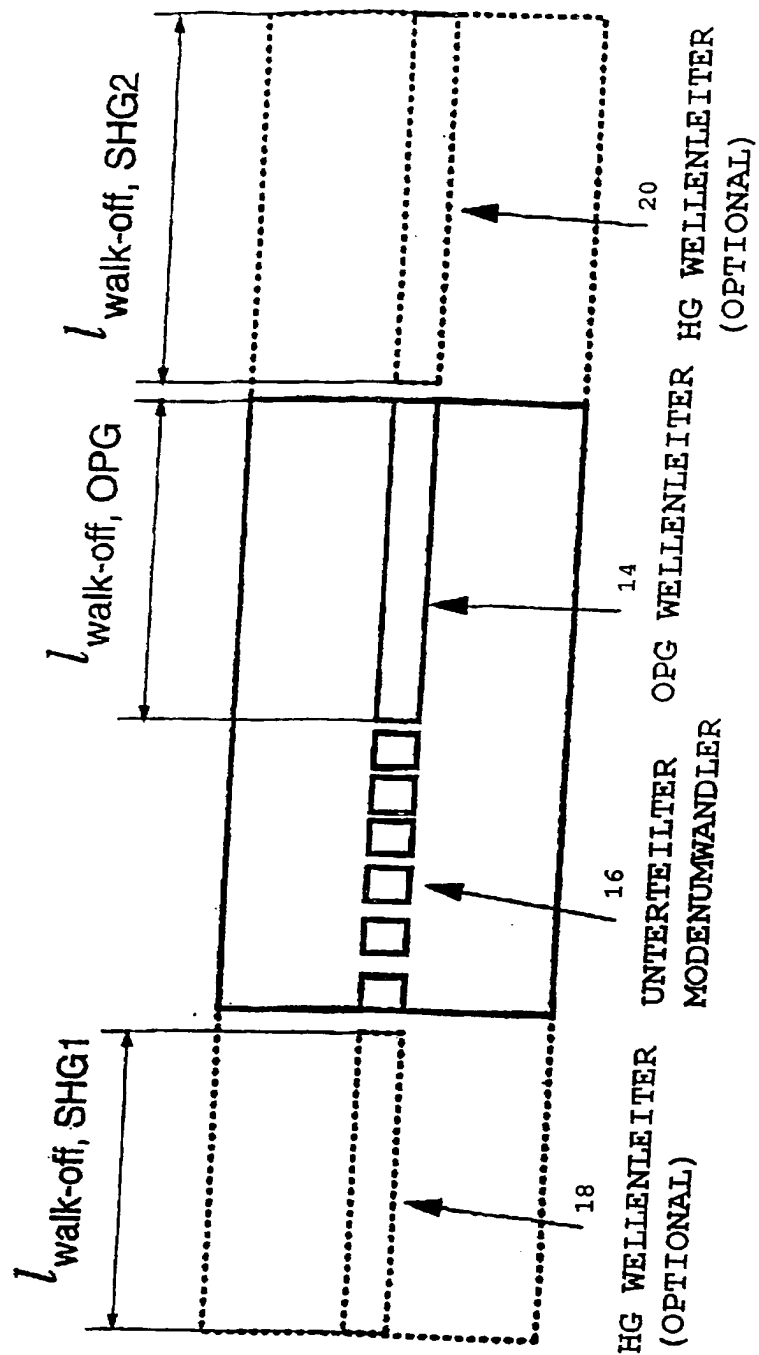


FIG. 3

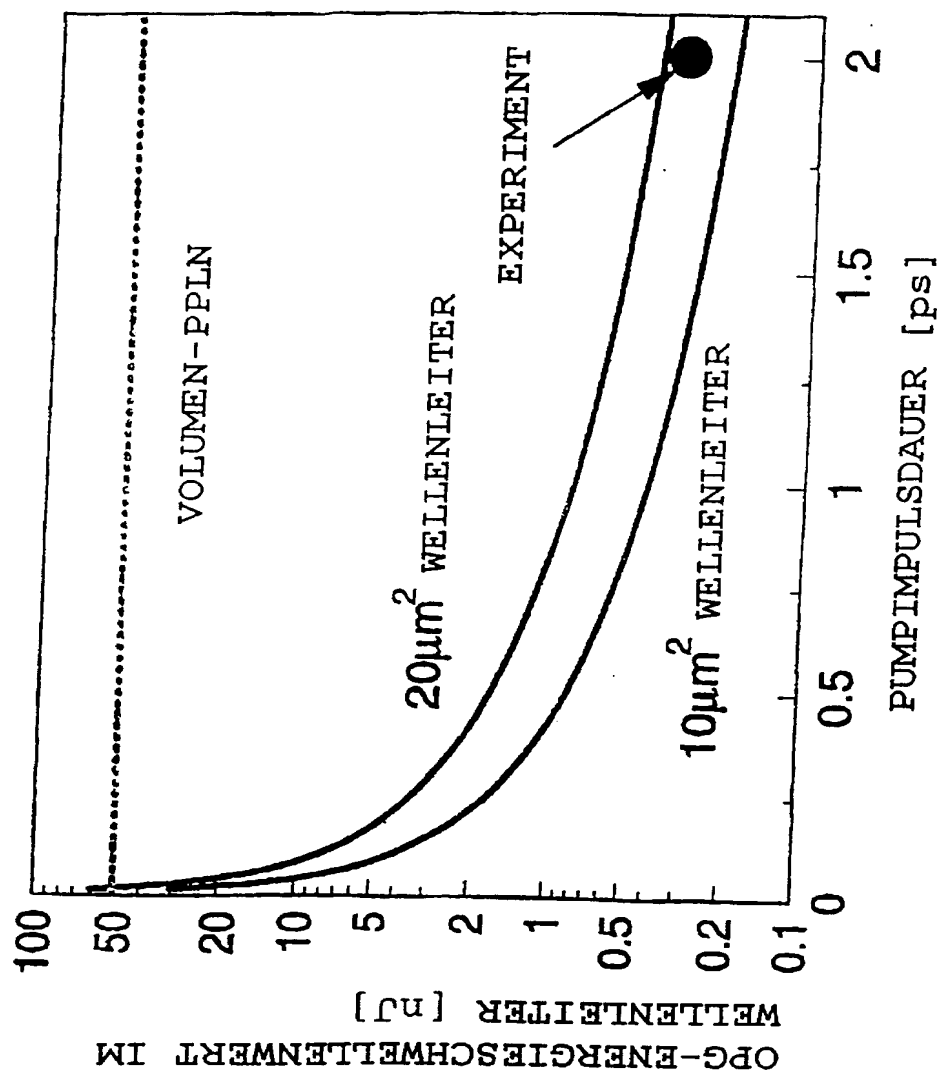


FIG. 4

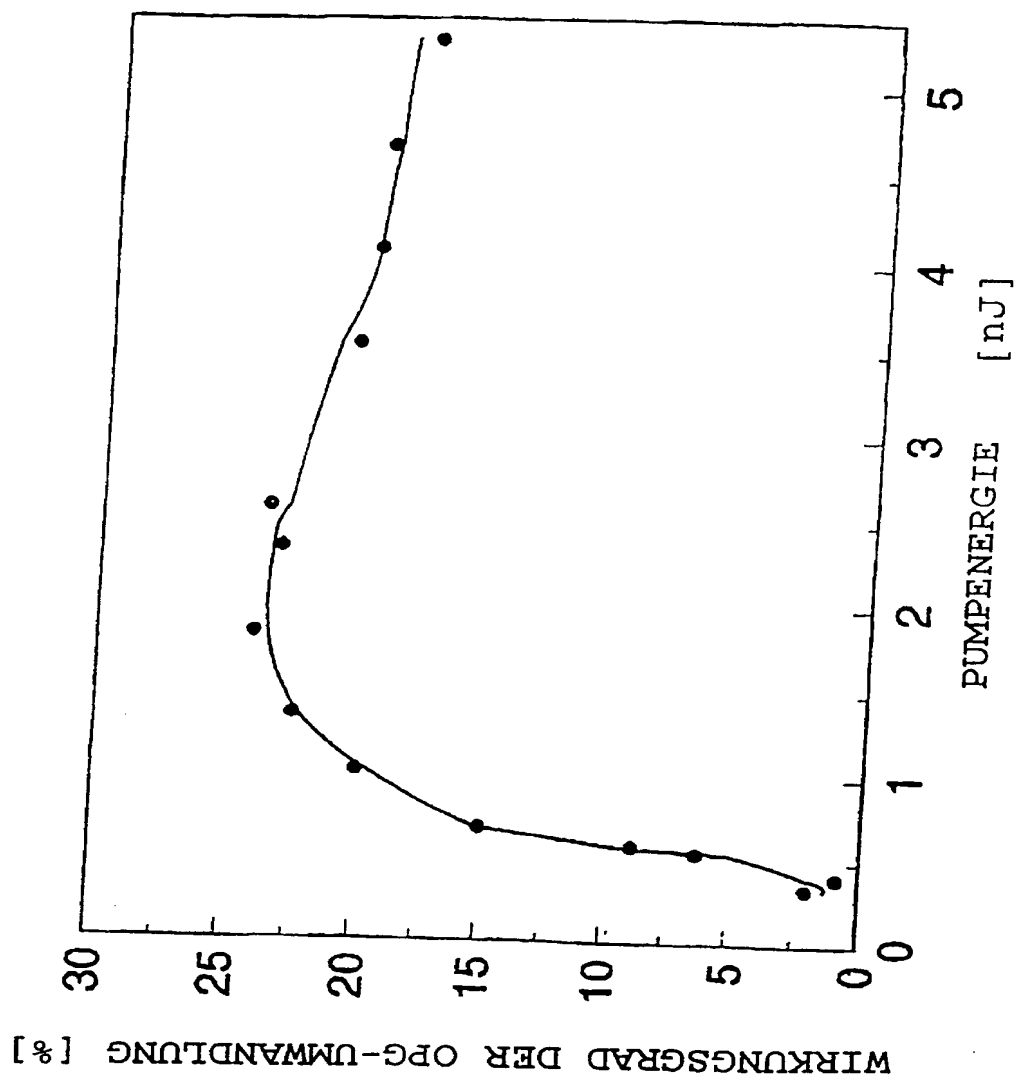


FIG. 5

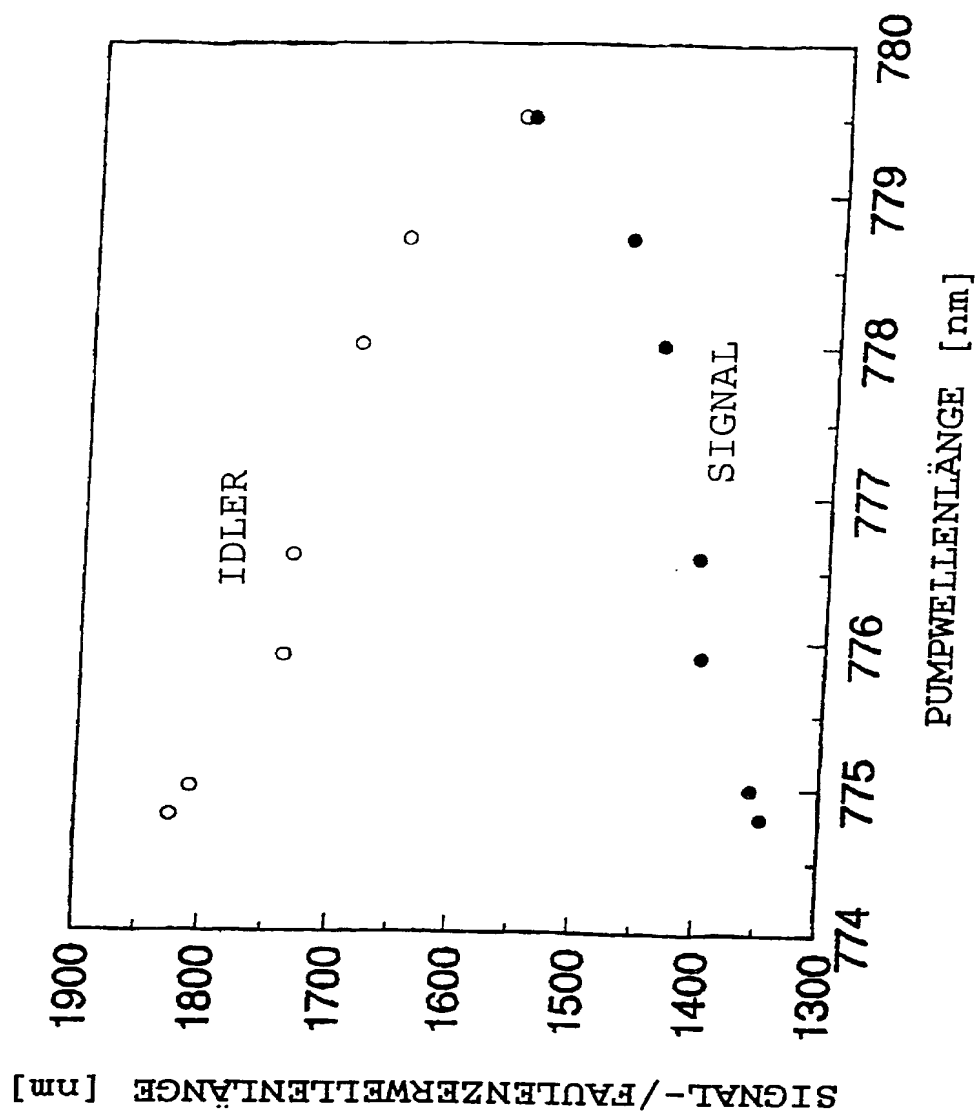


FIG. 6

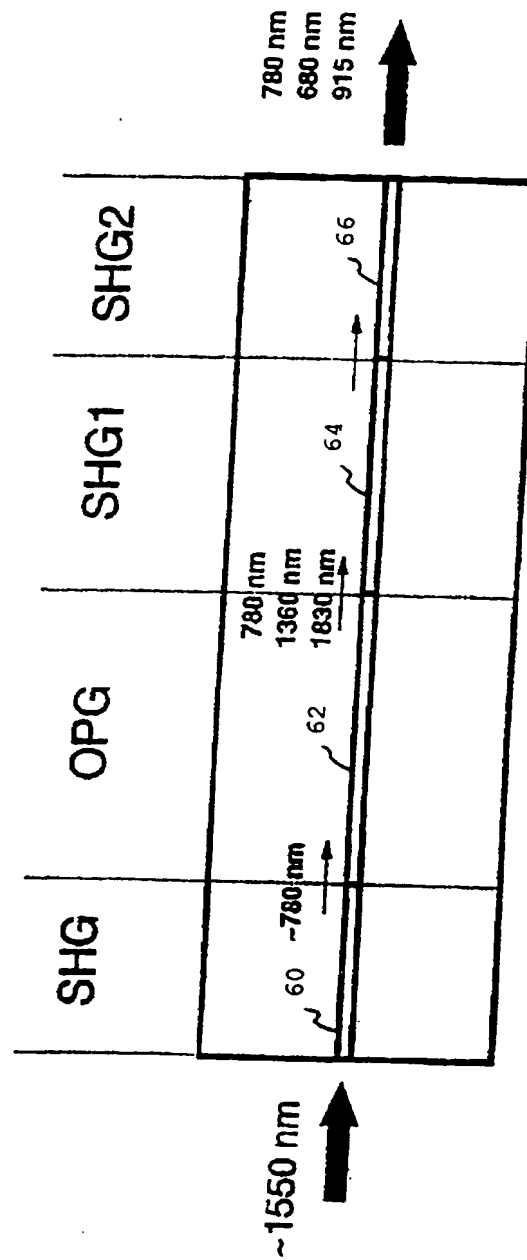
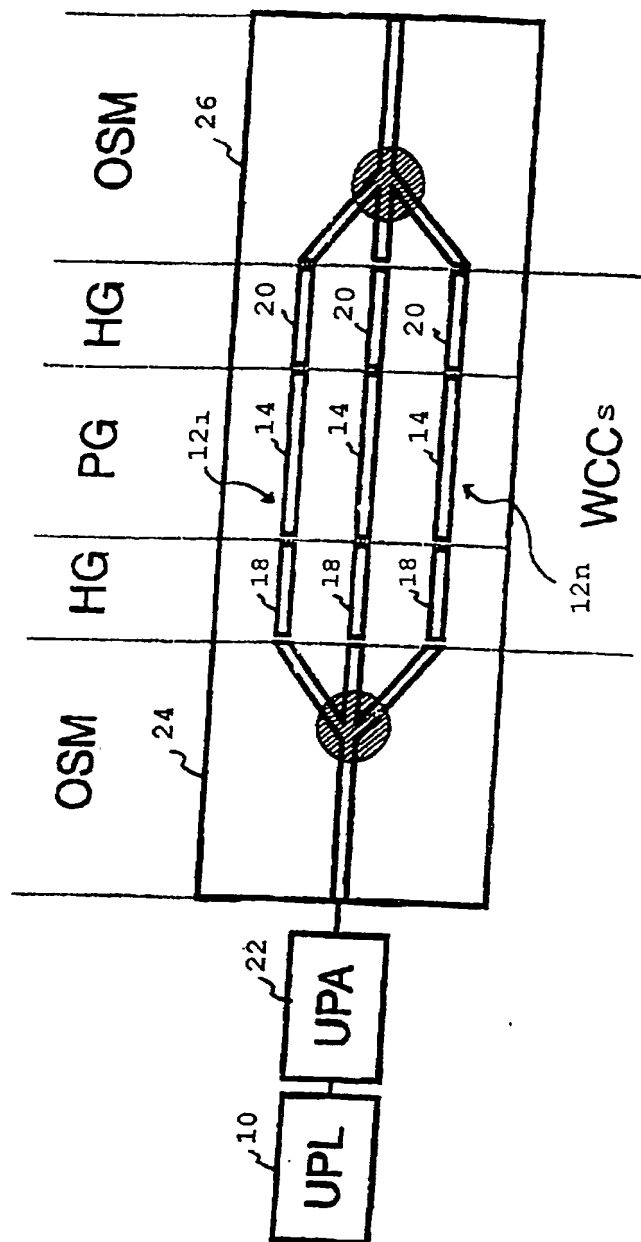


FIG. 7



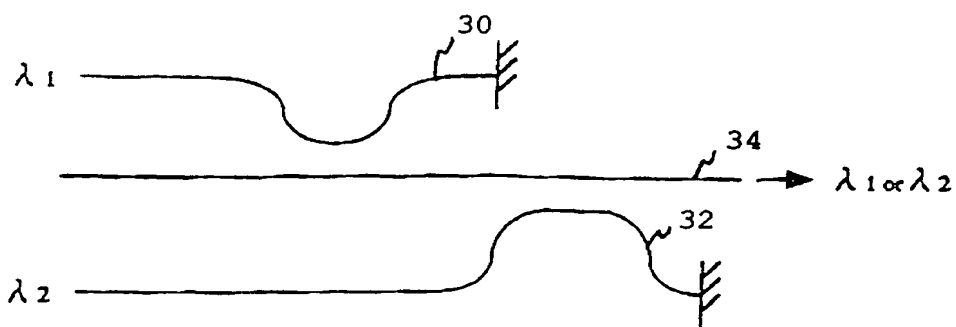


FIG. 8

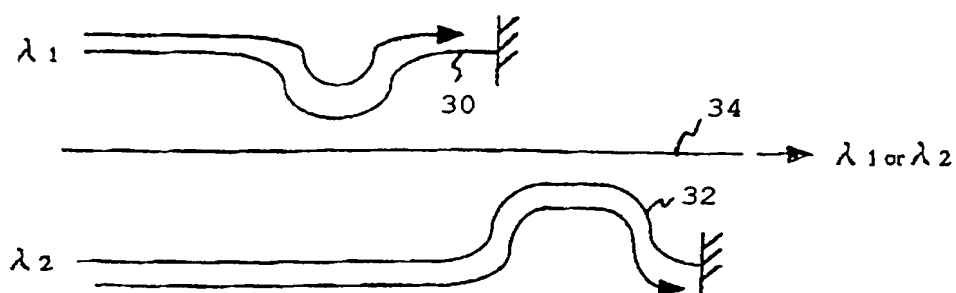


FIG. 9

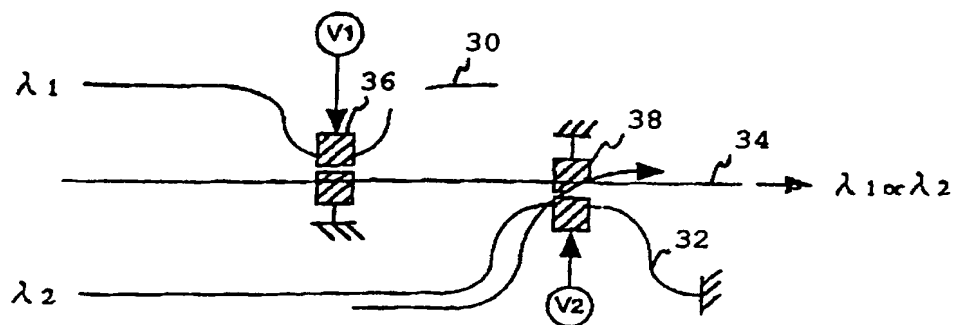


FIG. 10

FIG. 11

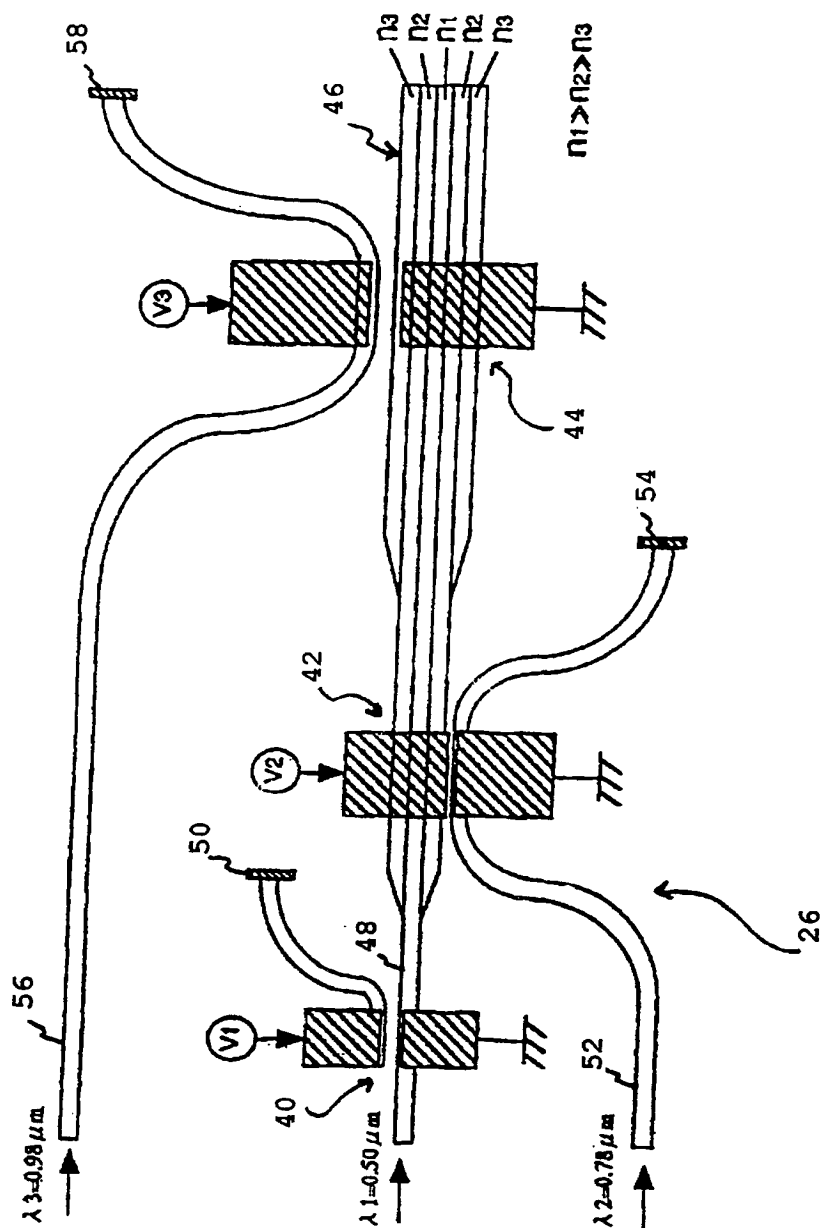
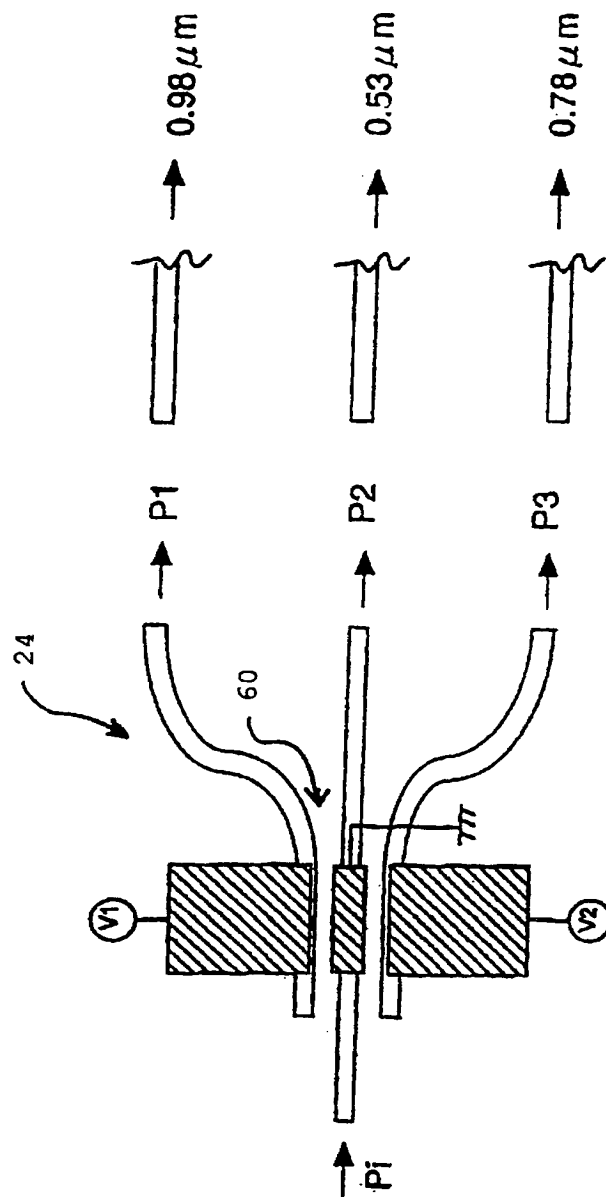


FIG. 12



$P_i = P_1, P_2, P_3$

FIG. 13

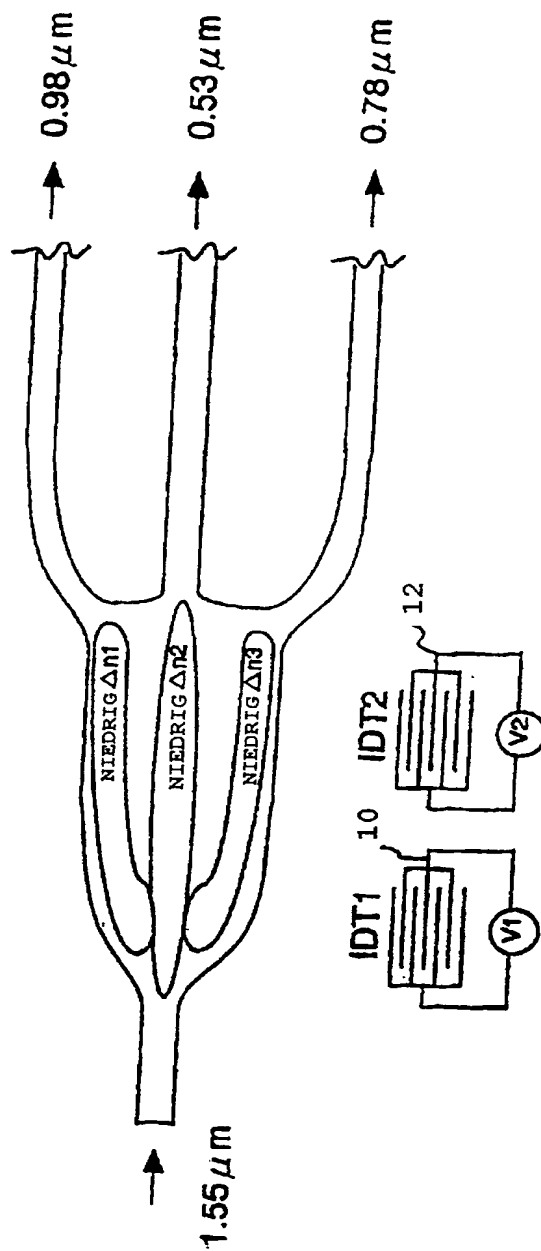


FIG. 14

